

[圧電性 SH タイプ境界波に関する検討]

山下高志 橋本研也 山口正恆

千葉大学 工学部 電気電子工学科

〒 263 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

I

あらまし 本報告では、非圧電体/圧電体構造の境界に沿って伝搬する SH タイプの圧電性境界波について理論的検討を行った。この境界波は、境界近傍による圧電反作用により、境界へ導波される。高圧電性基板を利用することにより、広い範囲での境界波の存在が期待される。そこで、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 に対して調べた結果、 Si/LiNbO_3 、 Si/LiTaO_3 、 $\text{YAG}/\text{LiNbO}_3$ の組合せで境界波が存在することが判った。その中でも $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle / 175^\circ \text{Y-X-LiNbO}_3$ 構造では位相速度 $4,465\text{m/s}$ 、電気機械結合係数 K^2 が 10.0%、伝搬損失がほぼ零という、良好な特性が得られることがわかった。次に、所望の非圧電性材料を実現するために、複合材料の適用を検討した。その結果、バイレックスガラスと燐化ケイ素から構成される複合材料と LiNbO_3 または LiTaO_3 と組合せたときにも、境界波が存在することが判った。

キーワード 境界波 圧電性 SH 波 存在条件 複合材料

[Highly Piezoelectric SH-type Boundary Waves]

Takashi Yamashita, Ken-ya Hashimoto and Masatune Yamaguchi

Dept. of Elec. & Electron. Engrg., Chiba Univ.

1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263, Japan

Abstract This paper describes theoretical considerations on piezoelectric SH-type waves propagating along a boundary between piezoelectric and non-piezoelectric materials. Since the wave is guided at the boundary piezoelectrically, use of highly piezoelectric materials may lead to existence of the wave for the combination with various materials. Numerical analysis shows that the waves exist for the combination of Si/LiNbO_3 , Si/LiTaO_3 and $\text{YAG}/\text{LiNbO}_3$. Note the electromechanical coupling factor K^2 of 10.0% with no attenuation and velocity of $4,465\text{m/s}$ is achievable on $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle / 175^\circ \text{Y-X-LiNbO}_3$. Then use of composite materials is also investigated for the synthesis of desired non-piezoelectric materials. The result indicated by the use of multi-layered structures composed from Pyrex-glass and SiN_x with LiNbO_3 and LiTaO_3 can also support this type of boundary waves.

key words boundary waves piezoelectric SH-type waves existence condition composite material

1 まえがき

近年、高周波通信機器の発展ならびに普及は目ざましく、それに利用される弾性表面波(SAW)デバイスには非常に高い性能が要求されている。

近年のSAWデバイスにおいては、従来のTV-IF等のSAWフィルタで利用されている $128^\circ\text{Y-X-LiNbO}_3$ やSTカット水晶等のレイリー波基板ばかりでなく、高速で極めて圧電性の強い $54^\circ\text{Y-X-LiNbO}_3$ や $35^\circ\text{Y-X-LiTaO}_3$ 、非常に優れた温度安定性を持つLSTカット水晶等の擬弾性表面波基板も利用されている[1]。最近では、強い圧電性を持つBGS波(Bleustein-Gulyaev-Shimizu waves)や[2]、高音速で温度安定性に優れた表面横波(STW)と呼ばれるSHタイプの波動も利用され始めている。

SHタイプの波であるBGS波における最大の利点は大きな電気機械結合係数(K^2)である。レイリー波SAWの K^2 が最大でも約20%程度であるのに対し、BGS波では50%程度(FZTの場合)の非常に大きい値を得ることができる。

ところで、これまでに挙げたSAWはすべて基板表面付近にエネルギーを集中させて伝搬する表面波である。それゆえ基板表面に他の物質が接すると特性が大きく乱れるため、その外乱を避けるためにパッケージが必要となる。ところがそれによって、デバイスの小型化、低コスト化に制限を与えてしまう。パッケージが不要となる波として、二つの媒体の境界にエネルギーを集中させた波であるストンリー波が知られている。しかしストンリー波はレイリー波タイプの波であり、強い圧電性が得られず、あまり実用的ではない。

また、境界波は任意の基板の組合せにおいて常に存在するわけではなく、上下の基板が一定の存在条件を満たさなくてはならない[3]。レイリー波タイプの境界波の場合、その存在範囲は極めて狭い。

そこで本報告では、非圧電体/圧電体構造の境界に沿ってSHタイプの圧電性横波を伝搬させることを考えた。SHタイプの擬弾性表面波に対して、高い圧電性を示す基板を境界波に利用した場合、広い範囲で境界波が存在し、しかも大きな圧電性と位相速度が得られるものと期待される。このような境界波を利用することによって、パッケージが不要で高性能なデバイスの作製が可能であると考えられる。

以下、本文中では境界波の存在条件を検討し、境界波が存在する構造を示す。さらに、そのときの伝搬特性(位相速度、電気機械結合係数、伝搬損失)が良好な値であることを、理論解析の結果をもとに述べる。また、非圧電体に接合材料を用いた場合についても検討を行ない、境界波が存在することを示す。

2 存在条件

まず、境界波の存在条件について調べる。ここでは計算を簡便に行なうために、図1に示すような等方体/圧電体(六方晶、BGS基板)構造の境界面を単純化した場合の存在条件について検討を行なった。

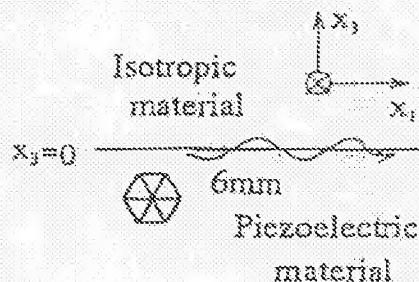


図1: 等方体/圧電体(六方晶、BGS基板)構造

境界条件より、このときの上下の基板における分散関係は次式で与えられる。

$$\sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_S}\right)^2} + \frac{c_{44}^p}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_S}\right)^2} = \frac{c_{44}^p}{2c_{11}^p}$$

ここで、 V_S は圧電体のSH波速度($=\sqrt{c_{44}^p/\rho}$ ($\rho=c_{44}^p/c_{11}^p$))であり、 V_S' は等方体のSH波速度($=\sqrt{c_{44}^p/\rho}$)である。また、境界波の速度は V とする。

まず、存在範囲の境界線について考える。 $V_S' > V_S$ のとき境界波の上限速度は V_S となる。そこで $V = V_S$ の等速度線を描くことで、上の境界線(Upper Limit)を表すことができる。同様に、 $V_S' < V_S$ のときの上限速度が V_S' であるから、 $V = V_S'$ とすると下の境界線(Lower Limit)を求めることができる。

得られる結果を図2に示す。この図2において、横軸は密度の比(ρ'/ρ)、縦軸は速度の比(V'/V_S)である。2本の線(Upper LimitとLower Limit)によって挟まれた領域が境界波の存在範囲を表す。ストンリー波と違ってSH波に注目したことにより、SH波速度と密度の簡単な関係で存在条件を表せることがグラフからもわかる。

また、 K_{SH}^2 は圧電体のSH波自体の電気機械結合係数($=c_{44}^p/c_{11}^p$)を表す(境界波の電気機械結合係数とは異なる)。この図では $K_{SH}^2 = 0.3, 0.5$ の場合について示してある。圧電性の大きな基板を用いることによって、存在範囲が拡大することがわかる。また $K_{SH}^2 = 0$ のとき、すなわち基板に圧電性がないときはこのような境界波は存在しない。なお、ストンリー波は基板に圧電性がなくても存在する。

では計
圧電
合の存

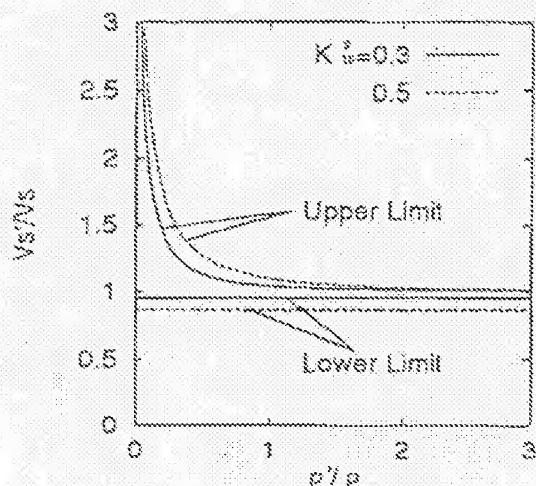


図 2: 等方体/圧電体 (六方晶, BGS 基板) 構造における境界波の存在条件

さらに、下の境界線が $V_s = V_{BGS}$ (V_{BGS} : 圧電体の BGS 波速度 $= V_s \sqrt{1-K^2}$) と等しくなっていることから、 $V_s < V_{BGS}$ のときは $V_{BGS} < V_s < V_s$ でなくてはならないことがわかる。一方 $V_s > V_{BGS}$ のときは、速度差が大きい場合でも密度比によっては存在条件を満たすことができる。

等方体/BGSW 基板における存在条件をまとめると、以下ようになる。

- 相対速度が近い ($V_s/V_{BGS} \approx 1$)
- 非圧電体と圧電体との密度比 (ρ/ρ_0) が小さい
- 圧電性が強い基板の選択

異方性の基板についても同様の存在条件を検討する場合、かなり複雑な計算となり、存在範囲を求めるのは困難である。そこで等方体/BGSW 基板における存在条件から、異方性基板における存在条件についても類推し、境界波の探索を行なった。基板として考えられる材料を図 3 に示す。図 2 の存在条件から考えると、図 3 において圧電体の左上にある非圧電体との組合せが望ましい。

境界波の探索には、実効誘電率による SAW の探索プログラム [4] を改造して用いた。その結果、Si/X-LiNbO₃、Si/X-LiTaO₃、YAG/X-LiNbO₃ の構造で境界波が存在することがわかった。

また、圧電体に Li₂B₄O₇ や水晶を用いた場合は、境界波は見つからなかった。これは、これらの圧電体の密度が小さく、さらに圧電性が弱いことによると考えられる。

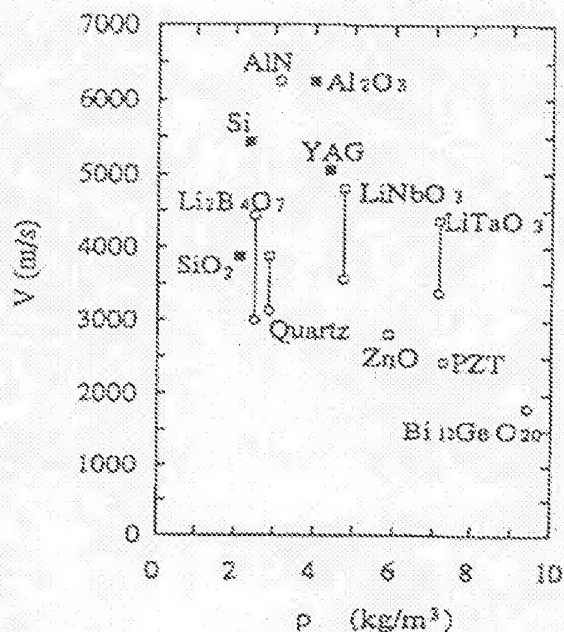


図 3: 主要な材料の密度 ρ と横波速度 V (○: 圧電体、●: 非圧電体)

3 伝搬特性

3.1 伝搬特性のカット依存性

前章で境界波が見つかった組合せの中で、最も良い特性を示した [001] カット Si/X-LiNbO₃ 構造における位相速度、電気機械結合係数 K^2 、伝搬損失のカット依存性を図 4 に示す。ここでグラフの横軸は LiNbO₃ のカットを表し、X 軸を回転の軸として Y カットから回転させたものである。

図 4 は位相速度、電気機械結合係数 (K^2) を表すグラフである。従来の境界波 (ストリーバー波) と比べてかなり大きな位相速度となっていることがわかる。また、全体的に非常に大きな K^2 を示すことがグラフからわかる。特に (110) 伝搬では 10 % 程度となっており、(100) 伝搬と比べても非常に大きな K^2 を得ることができる。これは [001] カット Si において、(110) 伝搬のほうが (100) 伝搬より Si の横波の速度が速く、LiNbO₃ の速度に近いのであると考えられる。また、 K^2 が大きいところでは位相速度が遅くなっていることがわかる。

図 6 は伝搬損失を表す。ここでの横軸は波の伝搬に伴う 1 波長あたりの減衰である。この場合、35°, 175° Y カットの付近で損失がほぼ零になっているので、このようなカットを利用することによって境界波の損失は無視できる。

伝搬特性として重要なものを順に挙げると

1. 損失が少ない (≈ 0)
2. 電気機械結合係数 K^2 が大きい
3. 位相速度が大きい

となる。

このことから考えて、図4,5より、 $[001]$ カット $\text{Si} \langle 110 \rangle$ 伝搬/ $175^\circ \text{Y-X-LiNbO}_3$ の組み合わせが最も良い特性を示したことになる。ここでの損失はほぼ零となり、 K^2 も 10.0 % と大きな値を得られることがグラフからわかる。

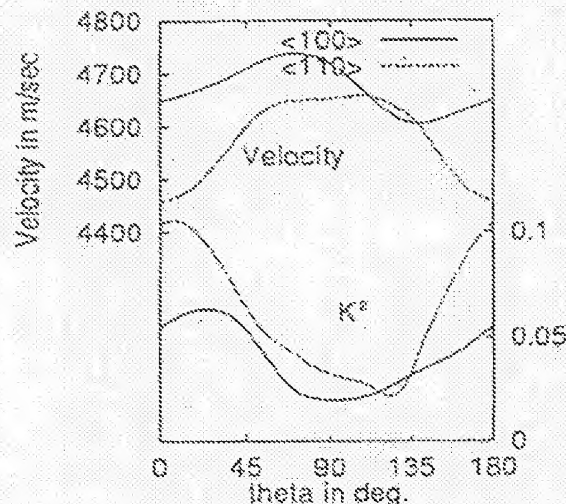


図 4: $[001]\text{Si}/\text{X-LiNbO}_3$ 構造における境界波の位相速度および電気機械結合係数

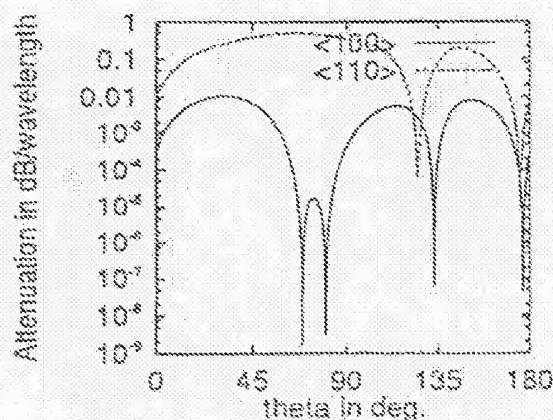


図 5: 伝搬損失

また、 Si/LiNbO_3 構造の Si のカットおよび伝搬方向を、 $[110]$ カット $\langle 001 \rangle$ 、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 伝搬、 $[111]$ カット $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 、

$\langle 112 \rangle$ 伝搬とした場合についても同様に調べた。その結果、 Si/LiNbO_3 構造ではそれぞれ異なる特性の境界波が存在することがわかった。伝搬特性としては、 $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle$ 伝搬と同様に、伝搬損失がほぼ零になるところで K^2 が大きいカットが存在したが、 $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle$ 伝搬ほどの圧電性ではなかった。

なお、 LiTaO_3 が LiNbO_3 と比べて密度が大きいので、 Si/LiTaO_3 構造でも境界波が得られた。しかし Si/LiNbO_3 構造ほどの圧電性は得られず ($\sim 4\%$)、境界波が存在する LiTaO_3 のカットも限定される。このことから、この境界波は基板の圧電性が大きく影響することがわかる。

また $\text{YAG}/\text{LiNbO}_3$ 構造の場合は、 Si/LiNbO_3 構造のときと同様に全てのカットで境界波が存在した。しかし Si/LiNbO_3 構造ほどの圧電性は得られなかった ($\sim 7\%$)。

3.2 変位分布

図6に $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle / 175^\circ \text{Y-X-LiNbO}_3$ 構造における変位分布を示す。グラフの縦軸は変位の絶対値である。 U_1 はそれぞれ x_1 方向の変位 u_1 の絶対値を、 $x_2=0$ のときの U_2 の値を1として規格化したものである。また、グラフの横軸は基板の深さを波長で規格化したものである。

この図からわかるように、 U_1, U_2 に比べて U_3 が占める割合がかなり大きい。また、実際にデバイスを作製するにあたって、この構造を用いた場合、 Si が3-4波長、 LiNbO_3 が3-4波長の厚さが必要であることがわかる。

また他のカットとの比較することによって、 K^2 が大きいところでは境界に変位が集中することがわかった。

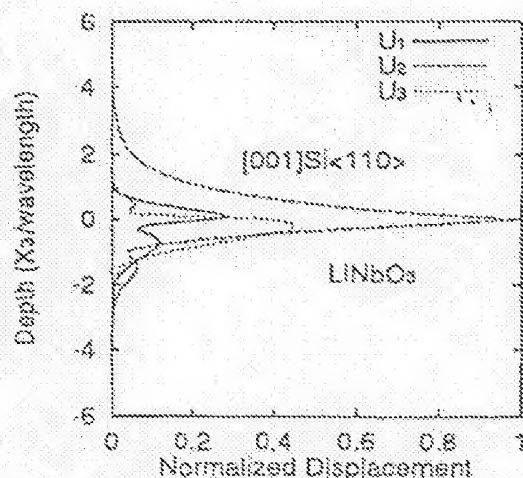


図 6: $[001]\text{Si} \langle 110 \rangle / 175^\circ \text{Y-X-LiNbO}_3$ 構造の変位分布 ($V=4,465 \text{ [m/s]}$, $\text{Loss} \approx 0 \text{ [dB/}\lambda\text{]}$, $K^2=10.0 \text{ [%]}$)

4 複合材料の検討

これまでの結果からもわかるように、境界波には存在条件があるため、基板の選択が重要な要素の一つである。ところが現状で、実際に境界波が存在する基板の組合せは数えるほどしかなく、またそれらの組合せも実際にデバイスを作製するうえで必ずしも最適であるとはいえない。

そこで、ここでは非圧電体に多層複合材料の適用を検討した。複合材料は、多層複合構造の各層の厚さが波長の波長に比べて十分小さく、複合材料全体が一様に振動する場合、等価的に一つの均一な材料とみなすことができる[5]。

本論文では各層を等方体とし、各層の境界が圧電体との境界面と平行であるような一次元多層複合構造の場合を考える。このとき、複合材料全体は六方晶的な対称性を持つ。図7に弾性波速度のR依存性を示す。材料は窒化シリコン(SiN₃)とパイレックスガラスとの組合せであり、Rはパイレックスガラスの体積比とする。

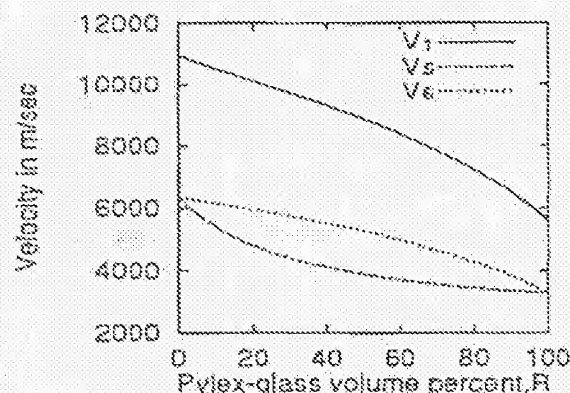


図7: 弾性波速度のR依存性

ここで $V_L = \sqrt{c_{11}/\rho}$ であり、 V_L, V_S, V_{SH} はそれぞれL波, SV波, SH波の速度を表す。また、複合材料の密度がRに比例することは明らかである(パイレックスガラスの密度 $\rho_p = 2.32 [g/cm^3]$, SiN₃の密度 $\rho_s = 3.19 [g/cm^3]$)。

これらの結果を踏まえて、複合材料/圧電体構造における境界波の探索を、これまでと同じ手法で行う。

5 複合材料/圧電体構造

非圧電体基板に複合材料を用いて、これまでと同様の理論解析を行なった。複合材料は前章同様、SiN₃とパイレックスガラスの多層構造とした。その結果、X-LiNbO₃との組合せで、 $R = 0.2 \sim 0.7$ の範囲で波の存在が確認できたので、得られた伝搬特性を図8, 9に示す。

非圧電体のSH波速度は $R=0.2$ のとき約 $6,000 [m/s]$ 、 $R=0.7$ のとき約 $4,650 [m/s]$ である。X-LiNbO₃の速い横波の速度が約 $4,800 [m/s]$ であることから考えると、非圧電体の下限速度は速い横波の速度にかなり近いことがわかる。一方、上限速度はかなり離れた値をとることができる。これらの結果からも、図2に類似した存在条件が成り立っていることがわかる。

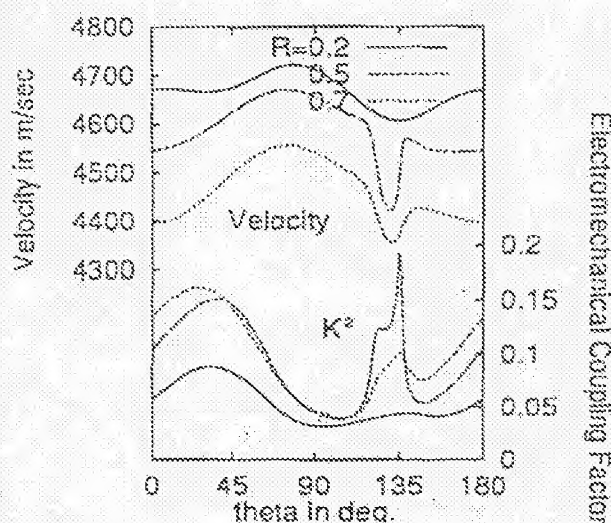


図8: 複合材料/X-LiNbO₃構造における境界波の位相速度および電気機械結合係数

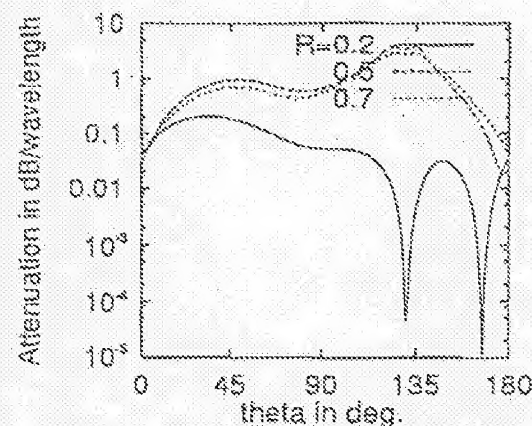


図9: 伝搬損失

また、X-LiTaO₃との組合せにおいても $R = 0.4 \sim 0.9$ の範囲で波の存在が確認できた。しかし、X-LiNbO₃ほどの圧電性は得られなかった。

非圧電体に複合材料を用いた場合、Siを用いたときと

比べて、損失がほとんど零になるカットが少ないことがわかる。これは、複合材料の速度と圧電体の速度の関係によるものであると考えられる。

また変位分布についても調べたところ、図10のようになった。 K^2 が小さいため、変位が境界に集中していないことがわかる。

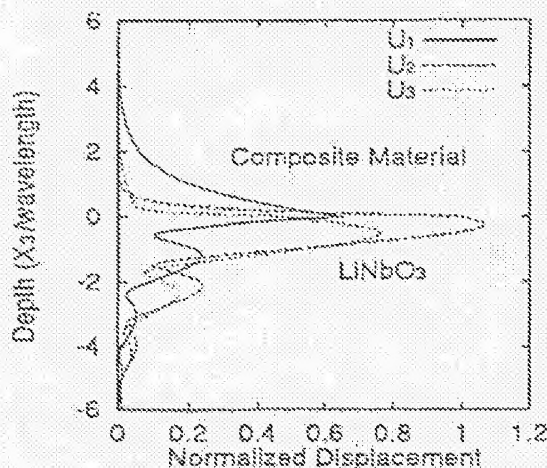


図10: 複合材料 ($R=0.2$)/ 167° Y-X- LiNbO_3 構造の変位分布 ($V=4,657$ [m/s], $\text{Loss} \approx 0$ [dB/ λ], $K^2=4.4$ [%])

6 まとめ

本報告では、非圧電体/圧電体構造の境界を伝搬するSHタイプの圧電性横波についての理論的検討を行った。

まず存在条件を求め、それに基づいて境界波の探索を行ったところ、いくつかの構造で境界波が見つかった。

それらの中で最も良好な特性を示したのは、 $[001]$ Si カット (110) 伝搬/ 175° Y-X- LiNbO_3 構造であり、そのときの伝搬特性は、位相速度が $4,460$ m/s、 K^2 が 10.0% で損失がほぼ零となった。また変位分布を調べることで、基板の厚さが圧電体と非圧電体がそれぞれ3~4波長程度必要であることがわかった。

さらに所望の非圧電体を得るために、非圧電体に複合材料を利用することを検討した。その結果、パイレックスガラスと窒化シリコンの複合材料と、 LiNbO_3 または LiTaO_3 とを組合せたとき、境界波が見つかった。しかし伝搬損失が大きく、Si/ LiNbO_3 構造のような理想的な組合せは存在しなかった。

今後、まず複合構造における温度特性について検討を行なう。パイレックスガラスを用いたことで良好な温度特性が期待できる。また、基板の組合せについてもさらに検討

を行ないたい。それらの結果をふまえて、実際に実験を行なうことが当面の目標である。

謝辞 本研究を始めるにあたり、有益な御意見を戴いた(株)東芝の三島直之様に感謝致します。また研究を進めるに際し、幾多の御協力を戴いた千葉大学の小川正太郎氏に感謝します。

参考文献

- [1] 鈴木, '弾性表面波材料の伝搬特性の利用と現状' 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J 75-A No. 2 (1993) pp.129-137
- [2] 門田, 諸角, 米山, 大橋, 'セラミック基板を用いたBGS波共振子とその応用' 第23回EMシンポジウム予稿集 (1994) pp.63-70
- [3] Y. Shimizu and T. Isono, 'Stonely Waves Propagating along an Interface between Piezoelectric Material and Isotropic Material', Proc. IEEE Ultrasonic Symposium (1983) pp.373-376
- [4] K. Hashimoto, Y. Watanabe, M. Akahane and M. Yamaguchi, 'Analysis of Acoustic Properties of Multi-Layered Structures by Means of Effective Acoustic Impedance Matrix', Proc. IEEE Ultrasonic Symposium (1990) pp.937-942
- [5] K. Hashimoto and M. Yamaguchi, 'Elastic, Piezoelectric and Dielectric Properties of Composite Materials', Proc. IEEE Ultrasonic Symposium (1986) pp. 697-702